

VŠB-Technická univerzita Ostrava  
Fakulta stavební  
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Stanovení parametrů smykové pevnosti zemin na smykové  
ploše sesuvu svahu s využitím metod mezní rovnováhy

Evaluation of the Share Strength Parameters on the Slip Plane  
Based on the Limit Equilibrium Methods

Student: Stanislav Římský  
Vedoucí bakalářské práce: doc. RNDr. Hruběšová Eva, Ph.D.

Ostrava 2010

### **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: .....

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové (bakalářské) práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové (bakalářské) práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: .....

.....

Podpis studenta

## **Anotace**

Cílem bakalářské práce je ověřit možnost stanovení parametrů smykové pevnosti zemin na smykové ploše sesuvu svahu s využitím metod mezní rovnováhy. Jedná se o stanovení pomocí inverzní analýzy s využitím výpočtového softwaru. V úvodu práce je vysvětlena základní problematika smykové pevnosti zemin a rozebrány rozdíly mezi skutečnou a naměřenou pevností. Následně je vysvětlen výpočet pomocí metody mezní rovnováhy a vysvětlena problematika inverzní analýzy. V další fázi je proveden výpočet, a to nejprve na zkušebním svahu a následně na svahu reálném. V závěru je celý postup shrnut a vyhodnocen.

## **Abstract**

The Goal of this bachelor thesis is to verify the determination's options of the shear strength parameters on the slip plane based on the limit equilibrium methods. This issue is about determination by back analysis the use of computational software. In the introduction there are some basic issues of the shear strength parameters and analyze differences between real and measured strength explained. Subsequently the evaluation by limit equilibrium method is explained including the issues of back analysis. In the next phase there is made an evaluation, firstly on the examining slope which is followed by a real one. In the last part is all process summarized and evaluated.

## Obsah bakalářské práce

Seznam použitého značení.....	1
<b>1 Úvod.....</b>	<b>2</b>
<b>2 Smyková charakteristika zemin.....</b>	<b>3</b>
<b>3 Typy smykových zkoušek .....</b>	<b>5</b>
<b>4 Rozdíly mezi skutečnou a naměřenou smykovou pevností.....</b>	<b>6</b>
4.1 Smyková pevnost zemin nesoudržných.....	6
4.2 Smyková pevnost zemin soudržných .....	7
4.3 Reziduální smyková pevnost .....	7
4.4 Odlišnost laboratorní metodiky od reálných podmínek .....	8
4.4.1 Vliv času.....	9
4.4.2 Vliv anizotropie.....	9
4.4.3 Vliv velikosti zkušebního vzorku.....	9
<b>5 Stabilita svahů .....</b>	<b>11</b>
5.1 Metoda mezní rovnováhy .....	11
5.2 Rovinná smyková plocha.....	12
5.3 Zakřivená smyková plocha.....	13
5.3.1 Pettersonova metoda .....	13
5.3.2 Bishopova metoda .....	15
<b>6 Inverzní analýza .....</b>	<b>17</b>
6.1.1 Dělení činností monitoringu ve vztahu k inverzní analýze .....	18
6.2 Charakteristiky vstupující do inverzní analýzy .....	18
6.2.1 Geometrické parametry .....	19
6.2.2 Fyzikální, pevnostní a přetvárné parametry .....	19
6.2.3 Napětíové parametry pro originální stav .....	19
6.3 Metody a postupy inverzní analýzy .....	19
6.3.1 Inverzní analýza s využitím regresní a korelační analýzy.....	20
6.3.2 Sbližovací výpočty inverzní analýzy.....	20
6.3.3 Inverzní analýza s přímým využitím optimalizačních metod .....	20
6.3.4 Graficko-početní metoda pro inverzní stanovení smykových parametrů zemin	21

<b>7</b>	<b>Výpočtový software GEO 5 .....</b>	<b>24</b>
<b>8</b>	<b>Praktická aplikace inverzní metody pro stanovení smykové pevnosti zemin na smykové ploše sesuvu .....</b>	<b>25</b>
8.1	Praktická aplikace na modelovém svahu .....	25
8.2	Praktická aplikace na reálném svahu .....	28
<b>9</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>33</b>
<b>10</b>	<b>Seznam literatury .....</b>	<b>34</b>
<b>11</b>	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>35</b>
<b>12</b>	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>36</b>
<b>13</b>	<b>Seznam vzorců .....</b>	<b>37</b>

## Seznam použitého značení

$b$	- Šíře proužku	$\alpha$	- Úklon svahu
$c$	- Soudržnost	$\gamma$	- Objemová tíha
$c_{ef}$	- Efektivní soudržnost	$\gamma_w$	- Objemová tíha vody
$c_{max}$	- Maximální hodnota soudržnosti	$\sigma$	- Napětí
$c_u$	- Totální soudržnost	$\sigma_{ef}$	- Efektivní napětí
$F$	- Stupeň stability	$\tau_f$	- Vrcholová smyková pevnost
$F_n$	- Stupeň stability na n-té ploše	$\tau_0$	- Počáteční smyková soudržnost
$F_0$	- Stupeň stability kritické plochy	$\tau_r$	- Reziduální smyková pevnost
$I_b$	- Index křehkosti	$\psi$	- Úhel dilatance
$l$	- Délka úseku smykové plochy příslušné danému proužku	$\varphi$	- Úhel vnitřního tření
$N$	- Normálová síla	$\varphi_{ef}$	- Efektivní úhel vnitřního tření
$N_{ef}$	- Efektivní normálová síla	$\varphi_{max}$	- Maximální hodnota úhlu vnitřního
$O$	- Střed smykové plochy	$\varphi_u$	- Totální úhel vnitřního tření
$R$	- Poloměr smykové plochy		
$s$	- Mobilizovaná smyková pevnost		
$u$	- Pórový tlak		
$W$	- Tíha proužku		
$x$	- Vzdálenost středu smykové plochy od působíště tíhy		
$X_n$	- Mezi proužková síla		

# 1 Úvod

Podstata řešeného problému v této bakalářské práci je stanovení parametrů smykové pevnosti zemin u porušeného zemního tělesa, jež primárně ovlivňují stabilitu svahovaných těles. Jedná se o stanovení pomocí obráceného postupu, takzvanou inverzní analýzou. Při níž z prvotních projevů deformací určujeme primární parametry zemin, v tomto případě parametry smykové pevnosti zemin. Aktuálnost tohoto poznatku spočívá v pouhé teoretické myšlence, pojednávající o možnosti řešení problému tímto způsobem, kterou je nutno ověřit pro eventuální využití v praxi. Jedná se o možnost využití u poruch svahovaných těles, u kterých by jako možná příčina mohla být špatně navržený sklon svahu vlivem nepřesnosti v uvažovaných parametrech zemin. V těchto případech by metoda sloužila k zpřesnění, nebo opravě. Dále by bylo možné ověřit správnost matematického modelu tohoto svahovaného tělesa.

Vhodnější model svahovaného tělesa a spolehlivější parametry smykové pevnosti zemin povedou ke zpřesnění výsledků, zmenšení rizik při následném užívání objektu, možnosti lepší sanace a zároveň k možné ekonomické úspoře při stejné, nebo i vyšší spolehlivosti výsledků.

Cílem práce je ověřit tuto metodu na modelových příkladech a následně na skutečném případě pro možnost jejího následného využívání v praxi a případně stanovit podmínky pro její využívání.

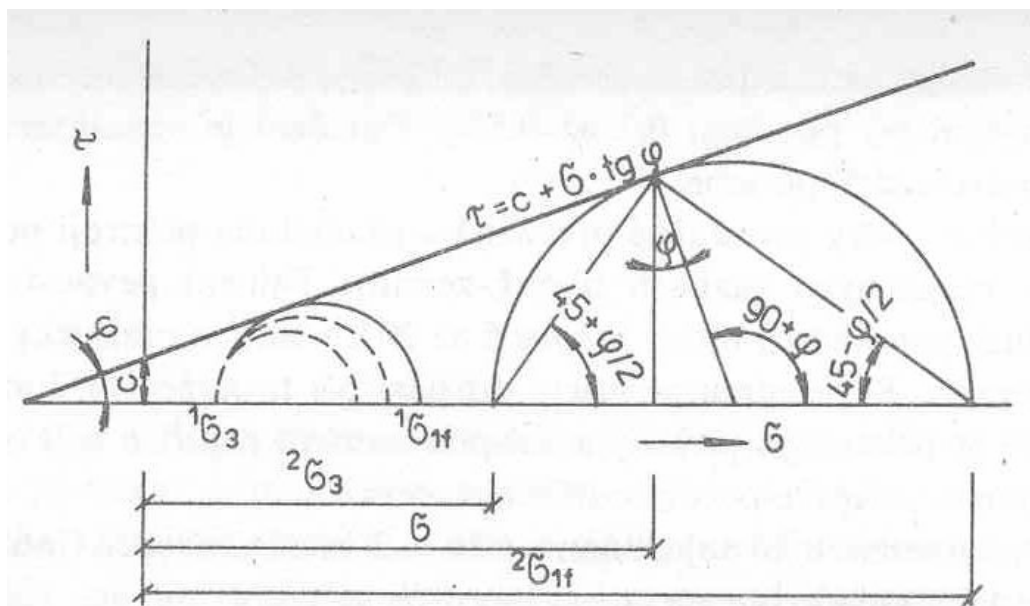


## 2 Smyková charakteristika zemin

Nejčastěji se zeminy při namáhání porušují smykem, proto je třeba znát smykovou pevnost zemin. Ta se stanovuje dle Mohra jako obalová křivka Mohrových kružnic a je závislá na normálovém napětí a na působícím smykovém napětí. Mohrova obalová křivka pak určuje smykové parametry zemin. Jedná se o úhel vnitřního tření a soudržnost. Dalším smykovým parametrem je úhel dilatance.

- Úhel vnitřního tření závisí především na velikosti zrn, tvaru zrn, ulehlosti zeminy a na přítomnosti vody.
- Soudržnost zeminy je schopnost odolávat smykovému namáhání bez působení normálové síly, je stanovována laboratorně pomocí zkoušek.
- Úhel dilatance vyjadřuje plastické objemové změny zemin.

Smyková pevnost zemin je stanovena dle Coulomba jako  $\tau_f = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi$  (viz obr. 1), pro nesoudržné zeminy, jejichž parametr  $c = 0$ , je rovnice rovna  $\tau_f = \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi$ . [2]

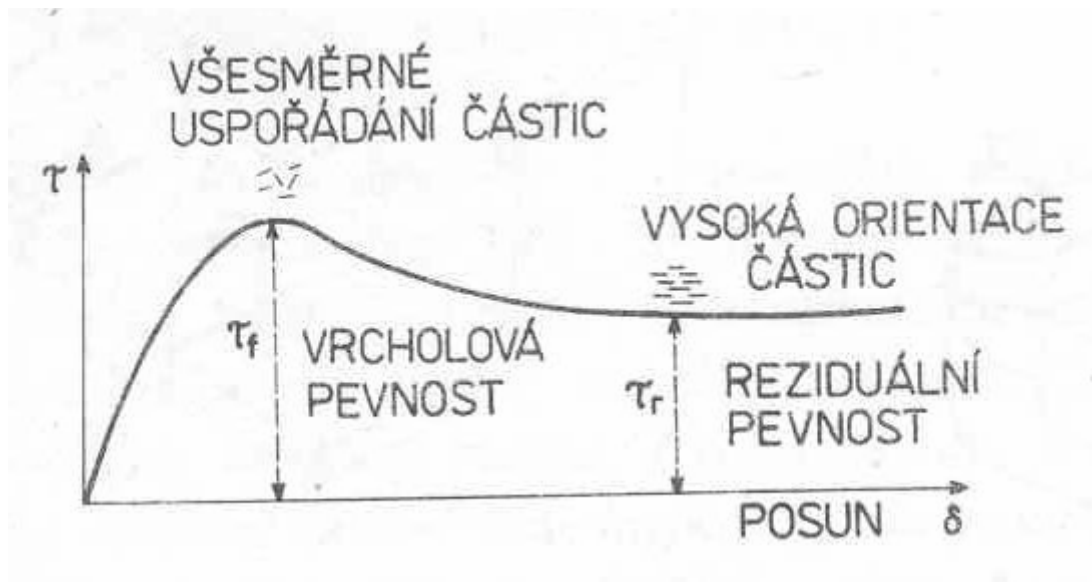


Obr. 1 Smyková pevnost dle Coulomba, Zdroj: [2]

V těchto rovnicích je nutné zohlednit princip totálních a efektivních napětí. Je rozdílné, zda nám působí napětí efektivní či totální. V případě změny totálního napětí za konstantního napětí efektivního, zůstává smyková pevnost stejná. Nezáleží při tom, zda ji vyjádříme pomocí totálních, či efektivních parametrů.

- Při počítání s totálními parametry smykové pevnosti  $\varphi_u$  a  $c_u$  platí rovnice  $\tau_f = c_u + \sigma * \operatorname{tg}\varphi_u$ . Parametry jsou určeny ze zkoušky neodvodněné.
- U výpočtu s efektivními parametry smykové pevnosti  $\varphi_{ef}$  a  $c_{ef}$  určených pomocí zkoušky odvodněné, nebo neodvodněné při měřeném pórovém tlaku, platí rovnice  $\tau_f = c_{ef} + \sigma_{ef} * \operatorname{tg}\varphi_{ef}$ , popřípadě  $\tau_f = c_{ef} + (\sigma - u) * \operatorname{tg}\varphi_{ef}$ . [2]

Jako smykovou pevnost zemin myslíme maximální vrcholovou pevnost zemin. Po dosažení této smykové pevnosti se u většiny zemin odpor proti usmýknutí zmenšuje až do hodnoty, kdy dojde k ustálení smykové pevnosti. Tato pevnost se nazývá reziduální pevností (viz obr. 2). Při tomto procesu se mění mikrostruktura zeminy ze všesměrné na vysoce orientovanou, přisuzovanou právě reziduální pevnosti.



Obr. 2 Reziduální smyková pevnost, Zdroj: [2]

### 3 Typy smykových zkoušek

Existuje několik typů smykových zkoušek a jejich volbu ovlivňují určité skutečnosti - účel, pro který zkoušku provádíme, typ zeminy, procesy probíhající v zemině a snaha, o co nejbližší přiblížení se ke skutečnému stavu v zemině.

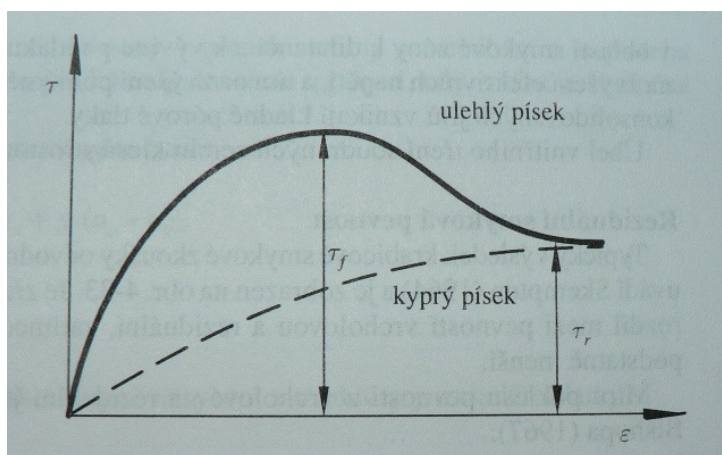
- Smyková zkouška neodvodněná, nekonsolidovaná (UU), pórový tlak se nemění, ani nedochází k odvodňování vzorku. Dostáváme totální hodnoty parametrů smykové pevnosti.
- Smyková zkouška konsolidovaná, neodvodněná s měřením pórového tlaku (CIUP), bez měření pórového tlaku (CAUP), zkoumaný vzorek je ponechán konsolidovat na určitý stav napětí a při jiném napětí je usmýknut. Navíc se při této zkoušce měří pórový tlak, při smýkání je zamezeno odvodnění. Výsledkem jsou jak totální, tak efektivní parametry pevnosti.
- Smyková zkouška konsolidovaná, odvodněná (CD). Vzorek je úplně konsolidován a smýkání je natolik pomalé, že umožňuje disipaci pórových tlaků. Dostáváme efektivní parametry smykové pevnosti.

## 4 Rozdíly mezi skutečnou a naměřenou smykovou pevností

„Pro zdůraznění rozdílů je nejdříve třeba specifikovat základní rozsahy smykových parametrů pro jednotlivé typy zemin a typy zkoušek a teprve následně poukázat na případné disproporce mezi změřenou pevností a její skutečnou hodnotou v určitém zemním tělese.“ [2]

### 4.1 Smyková pevnost zemin nesoudržných

Jsou to zeminy, u nichž jsou mezimolekulární síly zanedbatelné. Patří sem štěrky, písky, kamenité násypy a hrubé prachovité zeminy. U těchto zemin určujeme, s ohledem na jejich zatěžování ve skutečném prostředí a kvůli vyšší propustnosti, převážně efektivní parametry smykové pevnosti. Smyková pevnost je závislá na jejich stavu. Primární odlišnost mezi smýkáním u ulehlé a kypré zeminy je viditelná při smýkání na krabicovém přístroji. U ulehlé zeminy se odpor prudce zvyšuje, až dojde k ustálení růstu při dosažení maximální smykové pevnosti, následně dochází ke snižování až do ustálení na reziduální pevnosti. V případě kypré zeminy se odpor proti smýkání zvětšuje, až se ustálí na hodnotě blízké reziduální pevnosti (viz obr. 3). Zároveň se svisle deformuje. Ulehlá zemina se mírně stlačí a následně dochází ke zvýšení vzorku. Jedná se o nadzvedávání zrn pro lepší posun na smykové ploše, tento jev se nazývá dilatancí. U kypré zeminy dochází k zasouvání zrníček do sebe a ta se stává ulehlejší. Dochází ke kontraktanci. Po dosažení smykové pevnosti se napětí ve smykové zóně homogenizuje. V této etapě nabývá smyková pevnost a dilatance ustálených hodnot, jež zůstávají v dalším průběhu neměnné. Pro působící normálové napětí nabývá v této etapě pórovitost ustálené hodnoty, nezávislé na počáteční pórovitosti, jež Cassagrande označil jako kritickou.



Obr. 3 Závislost smykového odporu na ulehlosti, Zdroj: [3]

U ulehlých zemin při znázornění závislosti mezi smykovým napětím a působící normálovou silou, na několika provedených zkouškách, je možné odečíst hodnotu počáteční smykové soudržnosti  $\tau_0$ , jež je způsobena počátečním zaklíněním zrn.

Z popsaných případů je zřejmé, že úhel vnitřního tření zemin je funkčně závislý na počáteční pórovitosti. Při nižší pórovitosti je úhel vnitřního tření vyšší a naopak při vyšší pórovitosti dochází ke snižování úhlu vnitřního tření. Počáteční pórovitost má vliv na velikost rozdílu mezi vrcholovou smykovou pevností a pevností reziduální, jelikož reziduální pevnost nezávisí na počáteční pórovitosti. Pro rozdílnost hodnot mezi kyprými a ulehlými soudržnými zeminami se směrné hodnoty úhlu vnitřního tření zemin uvádějí v normách pro zeminy v rostlém stavu a ve stavu zhutněném.

## **4.2 Smyková pevnost zemin soudržných**

Podobné odlišnosti, které byly zaznamenány u smykové pevnosti kypré a ulehlé nesoudržné zeminy, jsou viditelné i u soudržných zemin například u jílu normálně konsolidovaného a překonsolidovaného. U překonsolidovaných zemin dochází na smykové ploše k nadzvednutí a vývinu podtlaku. Ten má za následek zvýšení efektivního napětí. Dochází k nárůstu poměrného přetvoření, při němž se zemina poruší. Naopak u jílu normálně konsolidovaných dochází ke vzniku kladných pórových tlaků. U smykových zkoušek konsolidovaných, odvodněných prováděných na triaxiálním přístroji je také možné sledovat odlišnosti u zemin normálně konsolidovaných a překonsolidovaných. Odlišnosti jsou jednak z titulu dilatance a kontraktance, jednak z titulu smykových napětí. Velikost soudržnosti je závislá na velikosti konsolidačního napětí a na čase působení, jelikož čas je podstatný pro vytvoření vazeb mezi zrny. Úhel vnitřního tření pro soudržné zeminy klesá s rostoucí plasticitou.

## **4.3 Reziduální smyková pevnost**

U krabicové smykové zkoušky je jasné vidět, že rozdíl mezi vrcholovou pevností a pevností reziduální je u překonsolidovaných jílu významně větší, než je tomu u normálně konsolidovaných jílu. Rozdíl mezi pevností vrcholovou a pevností reziduální lze vyjádřit indexem křehkosti  $I_b$  dle Bishopa. Index křehkosti je závislý na průběhu a rychlosti poklesu smykové pevnosti. Tento index je možné také definovat pro neodvodněnou pevnost

(například vrtulkovou zkouškou). Nejčastěji využívané metody pro stanovení reziduální pevnosti jsou krabicová zkouška na proříznutém vzorku, zkouška na reverzibilním krabicovém přístroji a zkouška na kruhovém smykovém přístroji.

Požadavek na měření je zaznamenat odpor zeminy proti smýkání při velkém přetvoření, kdy již došlo k vysoké orientaci zrn na smykové ploše. Pro tento požadavek je nutný velký vzájemný posun, pro vysoce plastické jíly až 1 m. U triaxiálního, nebo krabicového přístroje dráha posunu není dostatečná. Požadavku na dráhu posunu nejlépe vyhovuje kruhový smykový přístroj, kde je teoretická možnost modelovat libovolné posuny. V případě proříznutí vzorku na předpokládané smykové ploše dojde k urychlení zkoušky, ten lze pak zkoušet v krabicovém přístroji a výjimečně v triaxiálním přístroji. Nejobektivnější je měření reziduální smykové pevnosti na vzorku odebraném in situ ze smykové plochy.

Problematické měření reziduální pevnosti se věnovali Seyček a Havlíček (1975), dle kterých lze provádět reverzní zkoušky pouze na moderních krabicových přístrojích. Krabice se po každém smýkání posune do výchozí polohy za ponechání, nebo částečného snížení působícího normálového napětí. Pro nákladnost některých zkoušek se uplatňují korelační vazby, jež zohledňují skutečnost, že reziduální pevnost je nezávislá na předchozím napětí a je závislá na mineralogickém složení. Seyček a Havlíček (1975) korelují na základě některých indexových charakteristik. Nedokážeme-li naměřit reziduální smykovou pevnost, stanovujeme pevnost koncovou, což je pevnost po jednom usmýknutí v krabicovém přístroji. Z té je možné orientačně stanovit rozdíl mezi reziduální a vrcholovou pevností.

#### **4.4 Odlišnost laboratorní metodiky od reálných podmínek**

Při měření v laboratoři, popřípadě při měření polními zkouškami dochází k měření pevnosti za jistých podmínek, které mohou být odlišné od reálného chování při deformování in situ. Nebude zde probírán vliv odpovídajícího rozsahu zkoumaných vzorků vzhledem k rozlehlosti staveniště. Jedná se o vlivy, které mohou ovlivňovat měření hodnot zkoumané zeminy. Jeden ze základních rozdílů je, že napjatost zkoumaného vzorku neodpovídá napjatosti in situ. Což je případ středního hlavního napětí, kdy se ve triaxiálním přístroji konzervativně uvažuje rovnost plášťového napětí  $\sigma_2 = \sigma_3$ . Což nemusí odpovídat skutečnosti.

#### **4.4.1 Vliv času**

Zkoušky prováděné v laboratoři, jsou prováděny vzhledem k rychlosti skutečných procesů in situ relativně rychle. U zkoušky neodvodněné, nekonsolidované při stanovování pevnosti má tato skutečnost velký vliv, čemuž se věnoval Bjerrum (1973). Kvůli poruchám násypů založených na plastických jílech, pevnost změřená pomocí inverzní analýzy in situ byla významně menší, než byla naměřená pevnost stanovená vrtulkovou zkouškou in situ. Zpravidla je toto snížení pevnosti v čase připisováno vzrůstu vlhkosti ve středové části vzorku, vlivem sání při dilatanci, nebo migraci vlhkosti zapříčiněnou nerovnoměrným rozložením pórových tlaků v podstavách vzorků a ve středové části.

#### **4.4.2 Vliv anizotropie**

Pevnostní anizotropie zemin je zapříčiněna dvěma ovlivňujícími se faktory. Jedná se o geometrickou anizotropii, zohledňující geometrické uspořádání zrn a anizotropii napětí. Geometrická anizotropie vzniká při ukládání jednotlivých částic zeminy, kdy se sedimentující zrníčka ukládají vodorovně. „Anizotropie napětí je vyvolána kombinací historie napětí a geometrickou anizotropií. Výsledný efekt je pevností anizotropie ve vztahu napětí versus přetvoření.“ Vliv orientace vzorku při zkoušení neodvodněné pevnosti uvádějí Skempton a Hutchinson. V případě rovnoběžnosti smykové plochy a plochy sedimentace je dosažená pevnost nejmenší, tento poznatek je třeba brát v potaz, jelikož běžně zkoušené vzorky jsou orientovány svisle. U vývoje pórových tlaků má význam orientace vzorku z titulu různé anizotropie propustnosti. [2]

#### **4.4.3 Vliv velikosti zkušebního vzorku**

Zeminy mají ve své geologické struktuře různé oblasti diskontinuit, například vrstevnatost zemin, dislokace, staré smykové oblasti a dělicí roviny. U starých smykových ploch je nutno uvažovat se snížením smykové pevnosti až na hodnotu reziduální. Díky těmto skutečnostem záleží při odběru a zkoušení vzorku na jeho velikosti. U menších vzorků je větší pravděpodobnost, že odebraný vzorek nebude obsahovat plochy diskontinuit a bude tak při zkoušení vykazovat vyšší pevnost, než tomu je ve skutečnosti. U větších vzorků tato pravděpodobnost klesá a snižuje se i pevnost horniny. Zároveň je podstatná orientace ploch

diskontinuit vzhledem k ploše usmýknutí. Tento poznatek má velký vliv u tuhých až potrhaných jíílů. U těch je, pro stanovení skutečné pevnosti, třeba znát vzdálenost trhlinek a velikost zkušebního vzorku. Velikost vzorku pak musí být v poměru k této vzdálenosti. Při zkoušení štěrkovitých zemin (například štěrk jílovitý) se běžně odstraňují zrna větších rozměrů, jelikož vlastnosti zkoušené zeminy by byly z velké části ovlivněny výplňovým materiálem.



## 5 Stabilita svahů

Jedna z nejčastějších úloh v geotechnice je výpočet stability svahovaných těles. S poruchami se u svahů setkáváme jak v případě přirozených svahů, tak u svahů umělých, vzniklých inženýrskou činností, jako jsou hráze, násypy komunikačních těles, přehrady nebo svahované výkopy. Rozpoznání důvodů ztráty stability a návrh sklonu svahovaných těles je důležité jak z hlediska ekonomického, tak z důvodů ochrany půdy, finanční úspory při přesouvání zemin a z hlediska bezpečnostního, kdy podcenění návrhu může vést k porušení. Detailnější přístup závisí na složitosti podmínek a důležitosti navrhovaného svahu. Využívají se čtyři odlišné přístupy.

- Metoda mezní rovnováhy - řeší stabilitní problém porovnáním pasivních a aktivních sil na určité smykové ploše a postupně vyhledává plochu s nejmenším stupněm stability.
- Metoda mezního stavu rovnováhy - využívá Rankinovy teorie, řeší kritickou výšku svahu o určitém sklonu a daných smykových parametrech. Tato metoda se využívá velmi zřídka.
- Metoda řešení napjatosti a deformace zemního tělesa - stanovuje přetvoření svahovaného tělesa jako celku, nebo jeho jednotlivých částí, umožňuje srovnávat vypočtenou napjatost a napjatost při deformaci.
- Nomogramy, tabulky - při návrhu sklonu vycházejí z praktických zkušeností nebo z vyřešených případů. Doporučené sklony svahů pro výkopy jsou uvedeny v normě.

Při řešení stability svahů se vzhledem k jednoduchosti dají využívat metody mezní rovnováhy a ve složitějších případech lze uplatnit výpočet metodou řešení napjatosti a deformace zemního tělesa, při níž se využívá výpočetní technika.

### 5.1 Metoda mezní rovnováhy

Metoda počítá rovnováhu sil na zvolené smykové ploše. Ta může mít různý tvar, u homogenních soudržných zemin má tvar zakřivený, nejčastěji podobný kruhové ploše. U homogenních nesoudržných zemin se pak jedná o smykovou plochu rovinného tvaru.

U zemin pevnostně anizotropních, či nehomogenních má smyková plocha tvar obecný, odpovídající minimálnímu odporu.

Stupeň stability svahu je značen  $F$ . Jedná se o poměr maximální smykové pevnosti svahu ku působící smykové síle ve svahu. Konkrétně se jedná o poměr pasivních sil, jež nám svah stabilizují a sil aktivních, které přispívají k destabilizaci svahu. Rovnice pro výpočet stupně stability má pak tvar viz vzorec (1).

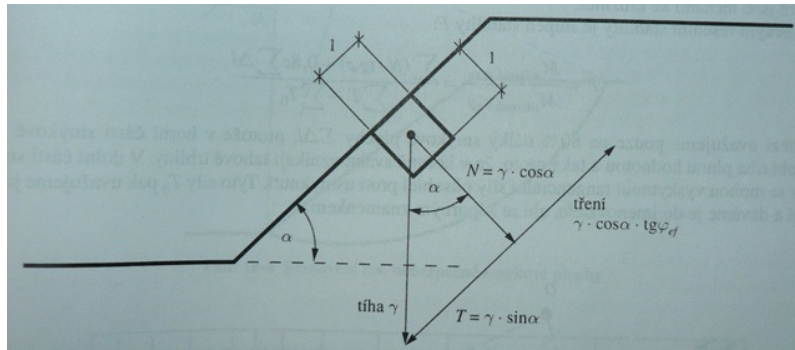
$$F = \frac{\text{Pasivní síly}}{\text{Aktivní síly}} \quad (1)$$

Popsaný způsob výpočtu je využíván pro svou jednoduchost, avšak neodpovídá skutečnému chování zemin, jelikož nepočítá s nárůstem pevnosti během přetváření zeminy. Další výpočet je ovlivněn smykovou pevností a jejím vyjádřením, existují tři způsoby výpočtu.

- Výpočet v totálních napětích s využitím totálních parametrů smykové pevnosti.
- Výpočet v efektivních napětích s využitím pórového tlaku - u tohoto výpočtu stanovujeme totální napětí na smykové ploše a působící pórový tlak.
- Výpočet v efektivních napětích s využitím proudového tlaku vody - zde stanovujeme efektivní napětí na smykové ploše pomocí tíhy zeminy a proudového tlaku.

## 5.2 Rovinná smyková plocha

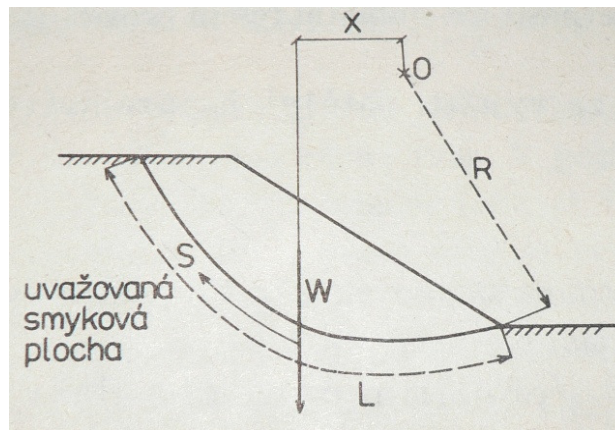
U výpočtu stability zemin, jež tvoří rovinnou smykovou plochu, lze stabilitu počítat jako rovnováhu sil na nakloněné rovině. Síly rozkládáme na sílu kolmou na smykovou plochu, jež násobíme tangentou úhlu vnitřního tření, a sílu rovnoběžnou s touto plochou. Jejich poměr pak odpovídá stupni stability  $F$ . U tohoto výpočtu lze zanedbat účinek bočních sil (viz obr. 4). V situacích kdy svahem prosakuje voda, se ve většině případů stabilita zmenšuje a je nutné s jejími účinky počítat. Přitom je důležitá výška hladina vody a směr jejího proudění.



Obr. 4 Rozklad sil na rovinné smykové ploše, Zdroj: [3]

### 5.3 Zakřivená smyková plocha

Jedná se o výpočet stability v soudržných zeminách, jejichž smykové plochy mají zakřivený tvar, často je uvažován tvar kruhový mající střed  $O$  a poloměr  $R$ . Výpočet probíhá z momentové podmínky ke středu  $O$  a vstupují do něj síly aktivní a pasivní, obě vynásobené příslušným poloměrem smykové plochy (viz obr. 5). Řešení probíhá jako rovinné a stav mezní rovnováhy nastane při rovnosti momentů. V praktickém výpočtu se využívá rozdělení svahu na proužky a výpočet je možné provádět s uvažováním sil od sousedních proužků, nebo bez nich.



Obr. 5 Síly na kruhové smykové ploše, Zdroj: [2]

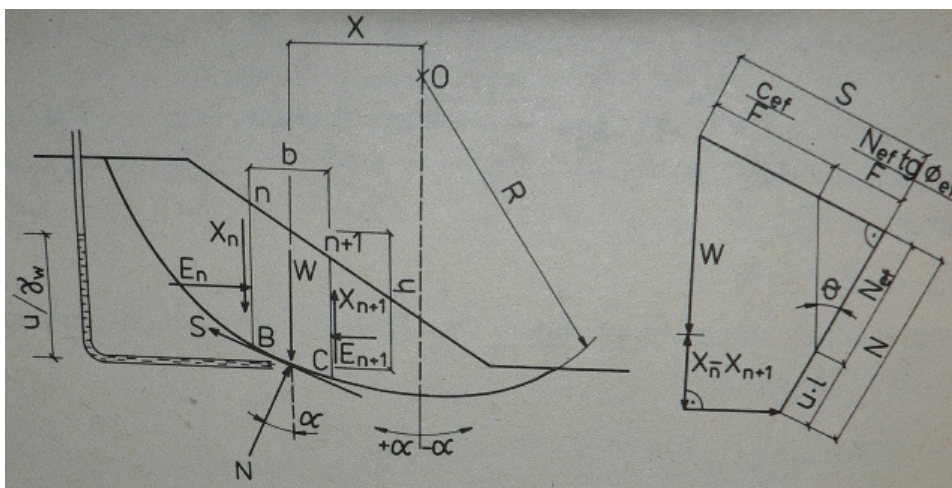
#### 5.3.1 Pettersonova metoda

U jednodušších výpočtů lze využít Pettersonovu metodu. Výsledky u této metody jsou vlivem neuvažování sil od sousedních proužků mírně konzervativní, využívá pouze momentovou podmínku ke středu  $O$  (viz obr. 6). Princip a základní vztahy této metody jsou uvedeny například v [2].



### 5.3.2 Bishopova metoda

Při výpočtu dle Bishopa uvažujeme síly od sousedních proužků a dosahujeme přesnějších výsledků. Princip a základní vztahy této metody jsou uvedeny například v [2]. U výpočtu stupně stability vycházíme z momentové podmínky stejně jako u Pettersona a dále z rovnováhy sil ve svislém směru pro každý proužek (viz obr. 7), rovnice uzavřeného silového obrazce a podmínky ve svislém směru má tvar vzorce (5).



Obr. 7 Schéma sil a uzavřený složkový obrazec pro jeden proužek pro jeden proužek u Bishopovy metody, Zdroj: [2]

$$N_{ef} = N - u * l = \frac{W + (X_n - X_{n+1}) - l * (u * \cos \alpha + \frac{c_{ef}}{F} * \sin \alpha)}{\cos \alpha + \frac{tg \varphi_{ef}}{F} \sin \alpha} \quad (5)$$

Při dosazení do rovnice pro stupeň stability z Pettersonovi metody a proložením  $l = b \cdot \sec \alpha$ , v níž je  $b$  šíře proužku, má rovnice tvar vzorce (6).

$$F = \frac{1}{\sum W * \sin \alpha} * \sum \left[ c_{ef} * b + (W - u * b + X_n - X_{n+1}) * tg \varphi_{ef} * \frac{\sec \alpha}{1 + \frac{tg \varphi_{ef} * tg \alpha}{F}} \right] \quad (6)$$

„Jde o Bishopovu rigorózní metodu. Její řešení postupným přibližováním je velmi náročné. Bishop sám zjistil, že zanedbání rozílu  $X_n - X_{n+1}$  má malý praktický význam. Po zkrácení

pak dostáváme výraz viz vzorec (7), který je běžně označován jako Bishopova metoda (též Bishopova zkrácená metoda).“

$$F = \frac{1}{\sum W \cdot \sin \alpha} * \sum \frac{c_{ef} * b + (W - u * b) * \operatorname{tg} \varphi_{ef}}{\cos \alpha + \frac{\operatorname{tg} \varphi_{ef} * \sin \alpha}{F}} \quad (7)$$

Zjišťovaný stupeň stability F se určuje postupným přibližováním, jako nejvýhodnější se jeví využít při prvním přibližovacím stupni hodnotu vypočtenou pomocí Pettersonovy metody. [2]

## 5.4. Obecná smyková plocha

Při výpočtu stability svahů tvořených nehomogenními zeminami, nebo v případech vrstevnatých zemin, je nutno počítat stabilitu pro obecné smykové plochy. Nabízí se dva způsoby řešení.

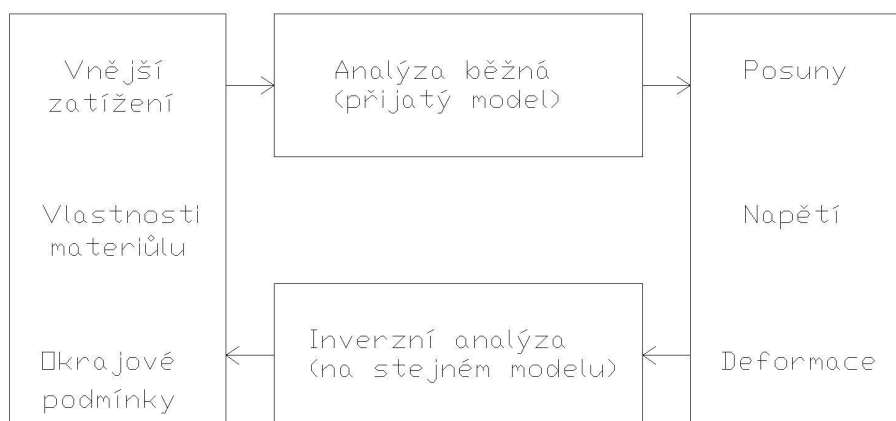
- Proužkové metody, stejně jako u kruhových smykových ploch dělí svah na proužky, ale smyková plocha má obecný tvar a je složené z na sebe navazujících zakřivených úseků.
- Klínové metody „řeší stabilitu určitého bloku nad zvolenou smykovou plochou, který je z boku zatížen aktivními a pasivními bloky zeminy.“ [2]

## 6 Inverzní analýza

„Poznatky získané při provádění inženýrských, podzemních a důlních staveb ukazují, že k řešení stabilitních problémů i otázek jejich vazby na vlastní technologii provádění (např. v případě ražení tzv. metodou NRTM), nelze využívat pouze získané zkušenosti, ale je nutno účinně zapojit moderní metody geomechaniky včetně monitoringu a inverzní analýzy.“ Analýza stabilitních problémů je složitý proces, jelikož většina procesů tvořící mechanické projevy hornin je závislá na několika vzájemně působících a ovlivňujících se faktorech. Ty jsou proměnné v čase a v prostoru a většinou tvoří situace, které jsme dosud neřešily. [1]

Výsledky při modelování jsou natolik spolehlivé, jak jsou spolehlivé parametry vstupující do výpočtu. Rozdíl mezi přesností matematického modelování a nižší vypovídací hodnotou metod při zjišťování vstupních přetvárných a pevnostních vlastností hornin se nabízí překonat pomocí metody kontrolního sledování, též nazývaného monitoring. Tato metoda nám poskytuje spolehlivé údaje o procesech uvnitř masívu a můžeme tak porovnat reálné chování masívu s vypočteným.

Složitost procesů probíhajících v zeminách dala podnět pro vývoj matematických postupů, obecně nazývaných inverzní analýza. Ta, pomocí naměřených hodnot, porovnává vypočtené chování se skutečností. Dochází ke zjišťování, zda parametry, vstupující do výpočtu, odpovídají zjištěným výsledkům. Dále pomocí inverzní analýzy zjišťujeme správnost celého matematického modelu a na základě vyhodnocení dochází ke zpřesnění, nebo ke změně modelu (viz obr. 8).



Obr. 8 Princip inverzní analýzy, Zdroj: [1], vlastní zpracování

## **6.1. Kontrolní sledování ve vztahu k inverzní analýze**

„Kontrolní sledování ve vztahu k inverzní analýze je systematická cílevědomá činnost zaměřená k určení fyzikálně-mechanického stavu horninového masívu a vývoje tohoto stavu v průběhu času.“ Využívání monitoringu má za úkol hlavně výběr nejlepší varianty ekonomického požadavku na bezpečnost konstrukce a postupnou úpravu technologie realizace vůči chování skutečného prostředí. Dále pak k navržení bezpečnostních opatření při dosažení varovných stavů. [1]

### **6.1.1 Dělení činností monitoringu ve vztahu k inverzní analýze**

- Technická definice problému ve vztahu k určení geotechnických, tektonických a strukturálních vlastností horninového prostředí, volba měřících zařízení a jejich umístění.
- Stanovení cílů monitoringu, čemuž odpovídá rozbor problému z hlediska ekonomického a stanovení přijatelných rizik. Stanovení varovných stavů a postupů při jejich dosažení.
- Určení veličin, které se budou sledovat a měřit, určení přístrojů pro sledování, míst ve kterých bude měření prováděno a jeho četnost.
- Samotný monitoring, který spočívá ve vlastním pravidelném měření veličin a jejich zpracovávání.
- Interpretace, srovnání vypočteného chování masívu se skutečným. Postupné zpřesňování geomechanického modelu pomocí inverzní analýzy.

V dostatečném předstihu před samotným započítáním prací, je nutné určit přirozené chování masívu v originálním stavu, určit jeho očekávané chování a stanovit geotechnický model prostředí.

## **6.2 Charakteristiky vstupující do inverzní analýzy**

Do geotechnického modelu vstupuje několik vlastností horninového prostředí a okrajových podmínek, jež odpovídají řešenému problému. Tyto parametry je možné rozdělit do několika skupin.



### **6.2.1 Geometrické parametry**

- Určujeme je většinou z geologického řezu masívu, jenž obsahuje strukturální popis.

### **6.2.2 Fyzikální, pevnostní a přetvárné parametry**

- Objemová hmotnost masívu v originálním stavu
- Pevnost masívu v tlaku a smyku
- Poissonova konstanta
- Hodnota modulu pružnosti masívu v tlaku, tahu a smyku
- Efektivní hodnoty soudržnosti a úhlu vnitřního tření
- Normálová a smyková tuhost dislokací

[1]

### **6.2.3 Napět'ové parametry pro originální stav**

- Směry a velikosti původních napětí
- Součinitel bočního tlaku
- Teplota masívu
- Hydrodynamický tlak proudící vody
- Pórové tlaky, atd.

[1]

## **6.3 Metody a postupy inverzní analýzy**

Inverzní analýza je určitým vyvrcholením celého procesu kontrolního sledování. Vychází z výsledků monitorovacích měření (např. posunů, pórových tlaků) v horninovém prostředí a na jejich základě pak provádí modifikaci vstupních charakteristik modelu s cílem dosáhnout co největší shody mezi naměřenými hodnotami a hodnotami stanovenými použitým matematickým modelem. Spolehlivost inverzně stanovených materiálových parametrů velkou měrou závisí na spolehlivosti a objektivitě výchozích monitorovacích měření využívaných pro inverzní analýzu. Tyto postupy lze rozdělit do tří kategorií.

- Jednoduchá inverzní analýza s použitím regresních a korelačních metod matematické analýzy.
- Sbližovací postupy.
- Inverzní analýza s přímým využitím optimalizačních metod.

### **6.3.1 Inverzní analýza s využitím regresní a korelační analýzy**

„Využívá se v jednodušších případech výpočtových modelů a zejména pro stanovení časových závislostí měřených a hledaných veličin.“ [1]

### **6.3.2 Sbližovací výpočty inverzní analýzy**

Tyto postupy jsou založeny na sérii postupných sbližovacích parametrických výpočtů s různými kombinacemi vstupních parametrů. Cílem je stanovení takové optimální kombinace jejich parametrů, která svým vlivem v daném modelu determinuje chování přibližující se chování reálného systému v některých monitorovaných hodnotách (např. posunů v určitých bodech). Tato metoda, z formálního hlediska jednoduchá, však vyžaduje velmi zkušeného realizátora této inverzní analýzy, který by efektivně posoudil citlivost celého modelu vůči určitým vstupním parametrům modelu. V opačném případě může být tato metoda inverzní analýzy zdlouhavá, neefektivní a nevede k žádoucím výsledkům. [4]

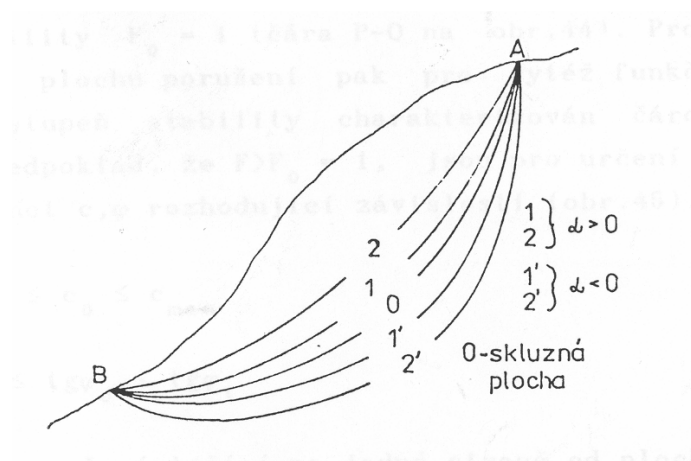
### **6.3.3 Inverzní analýza s přímým využitím optimalizačních metod**

Tato metoda je vhodná při znalosti analytického výrazu pro funkce měřených veličin, tedy hlavně při využití matematických modelů formulovaných analyticky. Minimalizace mezi vypočtenou a naměřenou hodnotou se provádí s využitím analytické podmínky minimalizace funkce.

### 6.3.4 Graficko-početní metoda pro inverzní stanovení smykových parametrů zemin

Mezi Inverzní postupy lze zařadit i graficko-početní metodu, jež využívá metod mezní rovnováhy pro inverzní stanovení pevnostních parametrů zemin na smykové ploše svahu. Tato metoda nevyužívá hodnot zjišťovaných monitoringem, pouze primárních projevů při ztrátě stability. Tuto metodu publikoval Saito (1980) a Yamagami (1984) a je založena na níže uvedených předpokladech.

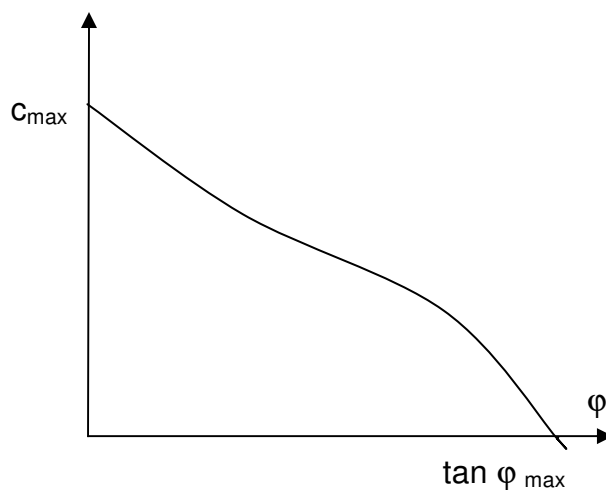
- Svah je složen z pevnostně homogenní horniny.
- Existuje pouze jedna plocha porušení, na které došlo ke ztrátě stability  $F_0 \cong 1$  (prakticky ale  $F_0$  leží v intervalu cca 0,9 - 1) a tento stupeň stability je minimální hodnotou ze všech  $F$  (viz obr. 9).



Obr. 9 Schéma možných smykových ploch ve svahovém tělese, Zdroj: [4]

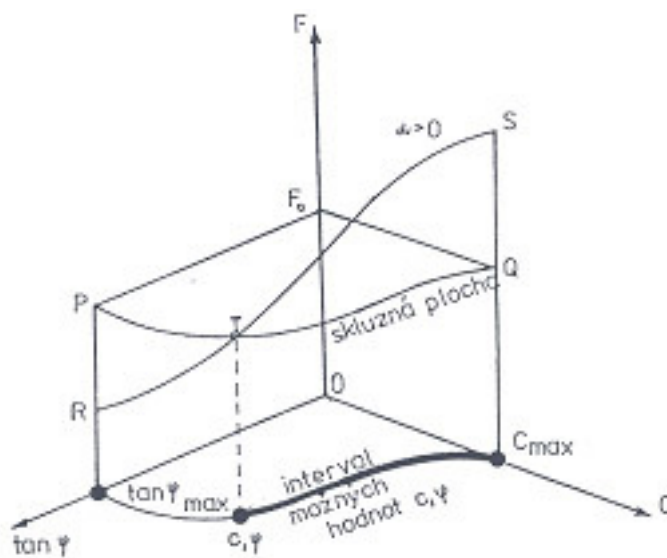
- Na každé jiné předpokládané ploše porušení (ležící nad a pod kritickou plochou) je  $F > F_0$ .
- Pevnostní parametry  $c_0$  a  $\varphi_0$  musí odpovídat svým vzájemným poměrem závislosti  $c = f(\varphi)$ , stanovené ze vztahů charakterizujících metodu výpočtu stability pro kritickou smykovou plochu (viz obr. 10), tj. pro  $F_0 \cong 1$ .

[1]



Obr. 10 Křivka závislosti pevnostních parametrů  $c$  na  $\varphi$ , odpovídající zvolené metodě mezní rovnováhy pro kritickou smykovou plochu, Zdroj: [4]

„Teoreticky tyto předpoklady znamenají, že při respektování hodnot  $c$  a  $\varphi$  ze závislosti  $c = f(\varphi)$  pro kritickou plochu porušení pak jakoukoliv funkční dvojici hodnot  $\varphi$  a  $c$ , bude stupeň stability  $F_0 = 1$ “ (viz čára P - Q na obr. 11). Pro další uvažovanou smykovou plochu, pro stejné funkční dvojice  $\varphi$ ,  $c$  bude stupeň stability znázorněn křivkou R - S . [1]



Obr. 11 Závislost stupně stability na pevnostních parametrech a zvolené smykové ploše, Zdroj: [4]

Dle platnosti předpokladu  $F > F_0 = 1$ , jsou pro determinování intervalu možných hodnot  $c$  a  $\varphi$  důležité tyto závislosti

$$c_I \leq c_0 \leq c_{\max}$$

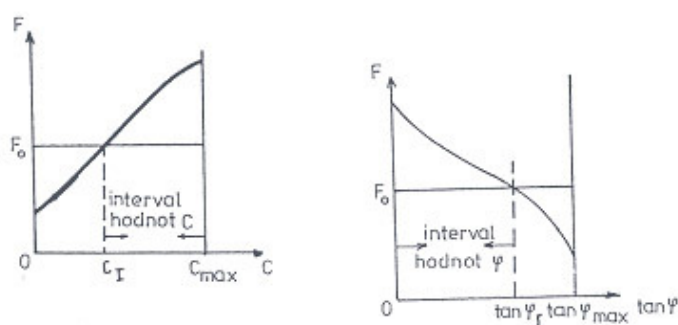
$$0 \leq \operatorname{tg} \varphi_0 \leq \operatorname{tg} \varphi_I$$

Ty jsou rozhodující pro smykové plochy na jedné straně od kritické smykové plochy a pro smykové plochy na druhé straně od plochy kritické jsou rozhodující tyto závislosti

$$0 \leq c_0 \leq c_I$$

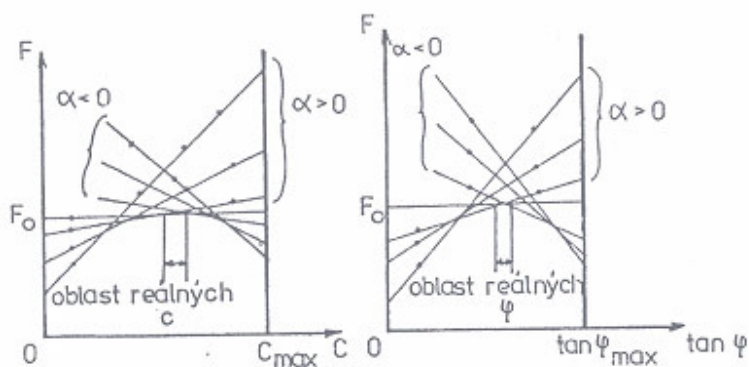
$$\operatorname{tg} \varphi_I \leq \operatorname{tg} \varphi_0 \leq \operatorname{tg} \varphi_{\max}$$

[1]



Obr. 12 Vyhodnocení intervalu možných hodnot pevnostních parametrů pro smykovou plochu lokalizovanou nad kritickou smykovou plochou, Zdroj: [4]

Pokud provedeme několik výpočtů pro různé předpokládané smykové plochy a budeme respektovat funkční závislost  $c = f(\varphi)$  a zároveň budeme respektovat předpoklady, na kterých je algoritmus založen, podaří se nám interval možných hodnot zúžit (viz obr. 12). Nejdůležitějším krokem pro aplikaci této metody je určení výchozí závislosti  $c = f(\varphi)$ . Tuto křivku je možno určit iteračním postupem z rovnice pro výpočet příslušného stupně stability, podle použité metody mezní rovnováhy (viz obr. 13).



Obr. 13 Schéma postupu pro inverzní stanovení pevnostních parametrů, Zdroj: [4]

## **7 Výpočtový software GEO 5**

Jedná se o program určený pro geotechnické výpočty, je složen z jednotlivých modulů, jež mají totožné uživatelské rozhraní a komunikují mezi sebou. Tyto moduly pracují samostatně, každý řeší vždy určitou geotechnickou úlohu a jsou založeny jak na analytických postupech, tak i na metodě konečných prvků. Program umožňuje nastavení všech koeficientů a výpočtových součinitelů, tudíž je možno počítat jak podle Eurokódu, tak podle norem příslušných pro jednotlivé státy.

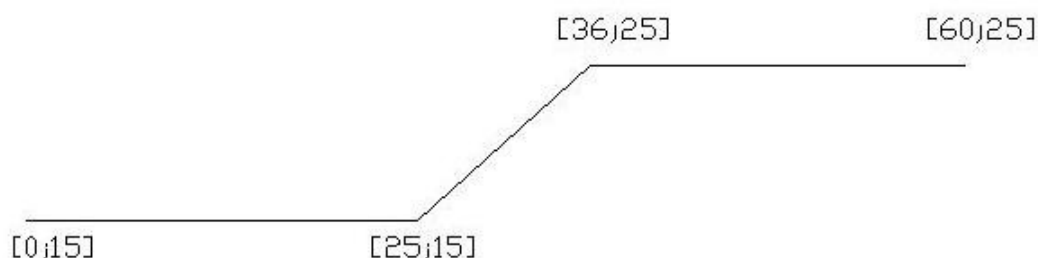
Při mém výpočtu jsem využíval modul stabilita svahu, který je určen k výpočtu obecně vrstevnatého tělesa. Obsahuje zabudovanou databázi zemin dle ČSN 73101 a do výpočtu je možné zahrnout také vliv vody. Obecně tento modul obsahuje množství nastavení, jež umožňují přizpůsobit program mnoha situacím.

## 8 Praktická aplikace inverzní metody pro stanovení smykové pevnosti zemin na smykové ploše sesuvu

V praktické části se jednalo o aplikaci inverzní analýzy na zadané svahy, konkrétně o aplikaci graficko-početní metody pro inverzní stanovení smykových parametrů zemin. Celý výpočet byl modelován v softwaru GEO 5 a byl zvolen výpočet dle Pettersonovy metody. Souběžně s tím byla prováděna aplikace inverzní metody pro určení intervalu možných hodnot smykových parametrů zemin.

### 8.1 Praktická aplikace na modelovém svahu

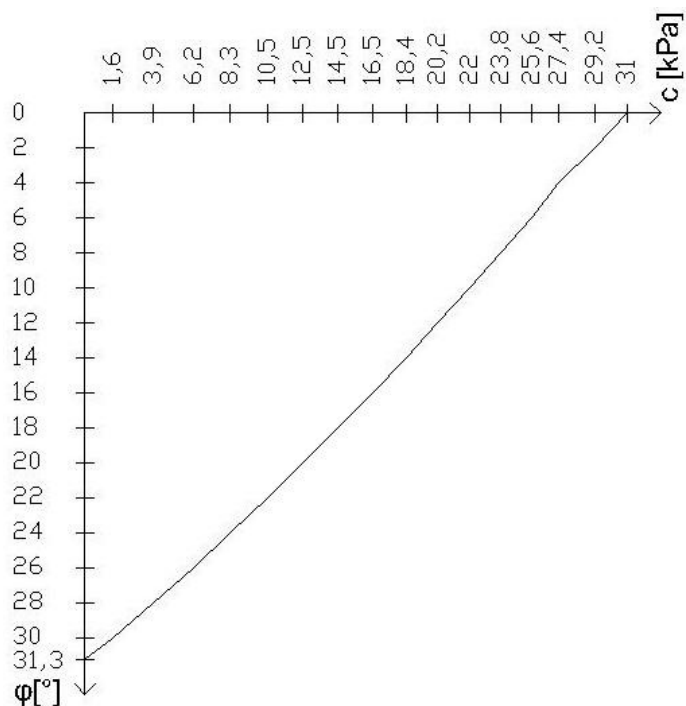
V prvním případě mi byl zadán svah, jenž byl předem namodelován a vypočten v GEO 5. Byla zvolena geometrie svahu, smykové parametry zemin a objemová tíha. S těmito parametry byl proveden výpočet kritické smykové plochy, jenž má stupeň stability rovný jedné, popřípadě blízký jedné na intervalu 0,9 - 1. Mé zadání obsahovalo objemovou tíhu zeminy  $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$ , geometrii svahu (viz obr. 14) a parametry smykové plochy  $S = [26,4;28,66]$ ,  $R = 13,73 \text{ m}$ .



Obr. 14 Geometrie modelového svahu, Zdroj: vlastní

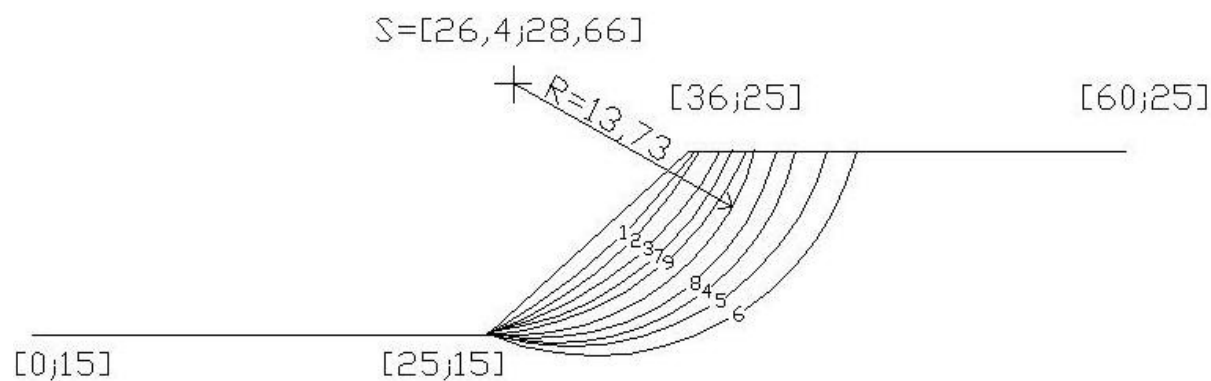
Řešení spočívalo ve stanovení smykových parametrů zemin a v porovnání s originálními parametry, jež byly použity k výpočtu v zadání. V první fázi jsem určil obor možných hodnot pro  $c$  a  $\varphi$  a dále se ho pokusil co nejvíce omezit. Interval možných hodnot jsem určil z proložení  $\varphi = 0$  a výpočtu odpovídajícího  $c$  při respektování stupně stability  $F = 1$  následně tento postup opakoval pro  $c = 0$ . Z tvaru smykové plochy je patrné, že skutečná soudržnost nebude rovna nule, ale pro stanovení krajních bodů křivky závislosti  $c = f(\varphi)$  je nutné stanovit i tento bod. Následně jsem pomocí iteračního postupu určil celou křivku zobrazující závislost

$c = f(\varphi)$  (viz obr. 15). V tomto případě představuje  $\varphi$  nezávisle proměnou s níž pracuji a  $c$  závislou proměnou. Interval možných  $\varphi < 0; \varphi_{\max} >$  jsem rozdělil po dvou stupních a výpočtem určil příslušné  $c$ .



Obr. 15 Závislosti  $c = f(\varphi)$ , Zdroj: vlastní

Následující krok byl návrh dalších smykových ploch, konkrétně šesti (viz obr. 16). Dále pak stanovení stupně stability na intervalu možných  $\varphi$  a  $c$  pro každou navrženou plochu.



Obr. 16 Další uvažované smykové plochy, Zdroj: vlastní

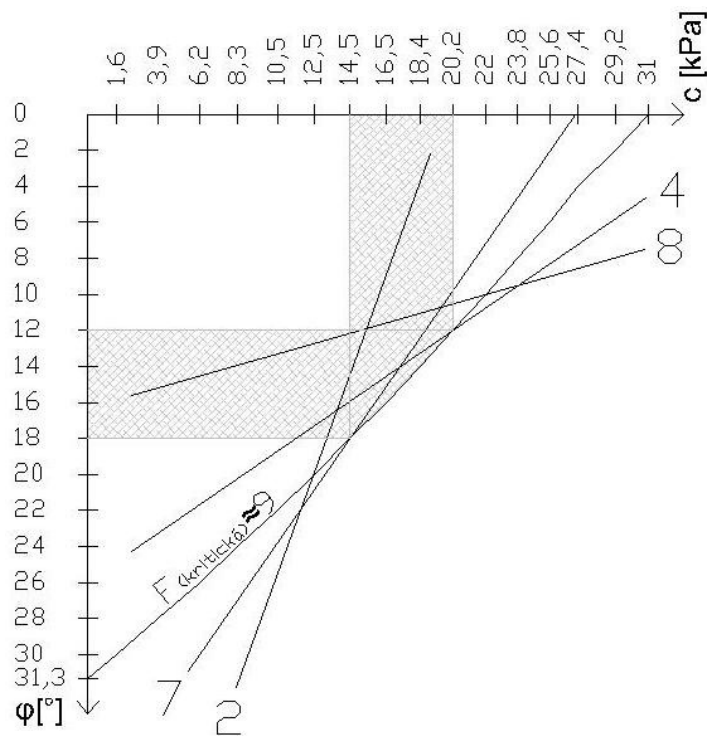
Postupně byly pro každou smykovou plochu měněny parametry  $\varphi$  a  $c$ , objemová tíha byla ponechána a pro každou možnou dvojici  $\varphi$  a  $c$ , určenou iteračním postupem na jednotlivých smykových plochách, byl spočítán stupeň stability (viz tab. 1).



číslo smykové plochy		2	7	9	8	4
$\varphi[^\circ]$	$c[\text{kPa}]$	$F_n$				
0	31	1,27	1,04	1	0,98	0,94
2	29,2	1,24	1,04	1	0,99	0,95
4	27,9	1,22	1,03	1	0,99	0,96
6	25,6	1,19	1,03	1	0,99	0,97
8	23,8	1,16	1,02	1	0,99	0,98
10	22	1,14	1,02	1	1	0,99
12	20,2	1,12	1,01	1	1	1
14	18,4	1,09	1,01	1	1,01	1,02
16	16,5	1,07	1,01	1	1,01	1,03
18	14,5	1,04	1	1	1,01	1,04
20	12,5	1,01	0,99	1	1,01	1,05
22	10,5	0,98	0,99	1	1,02	1,06
24	8,3	0,95	0,98	1	1,02	1,07
26	6,2	0,92	0,98	1	1,02	1,09
28	3,9	0,88	0,97	1	1,02	1,1
30	1,6	0,85	0,96	1	1,03	1,11
31,3	0	0,83	0,96	1	1,03	1,12

Tab. 1 Stanovené stupně stability na jednotlivých smykových plochách, Zdroj: vlastní

Při respektování základního předpokladu, že existuje jen jedna kritická smyková plocha a všechny ostatní smykové plochy mají stupeň stability vyšší, je možné zmenšit interval možných  $\varphi$  a  $c$ . Každá tato dvojice, jež má na některé z uvažovaných smykových ploch stupeň stability menší než jedna, bude z intervalu možných hodnot vyřazena. Graficky je toto znázorněno pomocí křivek, kdy každá křivka charakterizuje smykovou plochu a její závislost stupně stability na změně  $\varphi$  a  $c$  (viz obr. 17). V této fázi jsem ještě interval nezávislé proměnné  $\varphi$ , pro větší spolehlivost, rozdělil a to po jednom stupni na už zredukovaném intervalu.

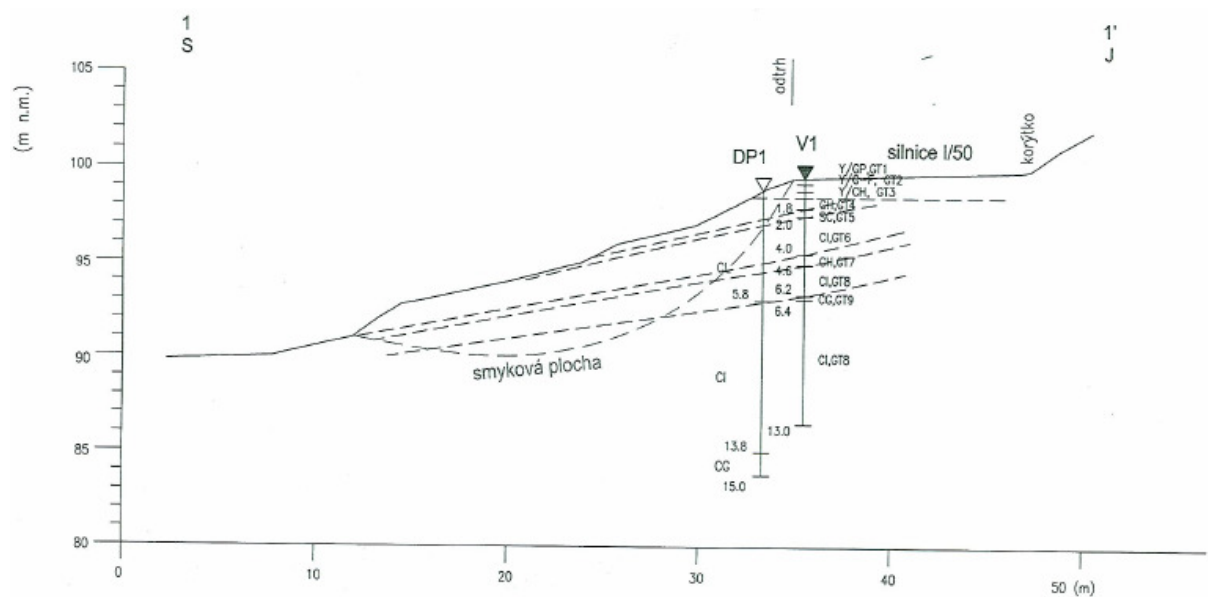


Obr. 17 Graficko-početního přístupu, Zdroj: vlastní

Po zredukování intervalu možných hodnot jsem získal interval pro  $\phi <12;18> [^\circ]$  pro  $c <14,5;20,2>[\text{kPa}]$ . Pro kontrolu mi byly poskytnuty originální hodnoty jenž jsou  $\phi = 15^\circ$  a  $c = 18\text{kPa}$ . Při porovnání originálních hodnot a vypočteného intervalu možných hodnot lze vidět, že leží ve vypočteném intervalu. Velikost intervalu je ovlivněna přesností, s níž software počítá. Obecně lze tedy prohlásit, že pro tento případ je metoda použitelná a odchylky nejsou nikterak velké.

## 8.2 Praktická aplikace na reálném svahu

V druhém případě mi byly poskytnuty společností UNIGEO a.s.(konkrétně Ing. Ryšávkou) parametry pro skutečný svah, na němž došlo k vytvoření smykové plochy a sesuvu. Jedná se o lokalitu blízko Uherského Hradiště, konkrétně Holý kopec u Buchlovic. Byl mi poskytnut geologický řez (viz obr. 18) obsahující geometrii svahu a zaměřenou smykovou plochu. Dále pak příloha (viz tab. 2) obsahující geotechnické charakteristiky zemin.



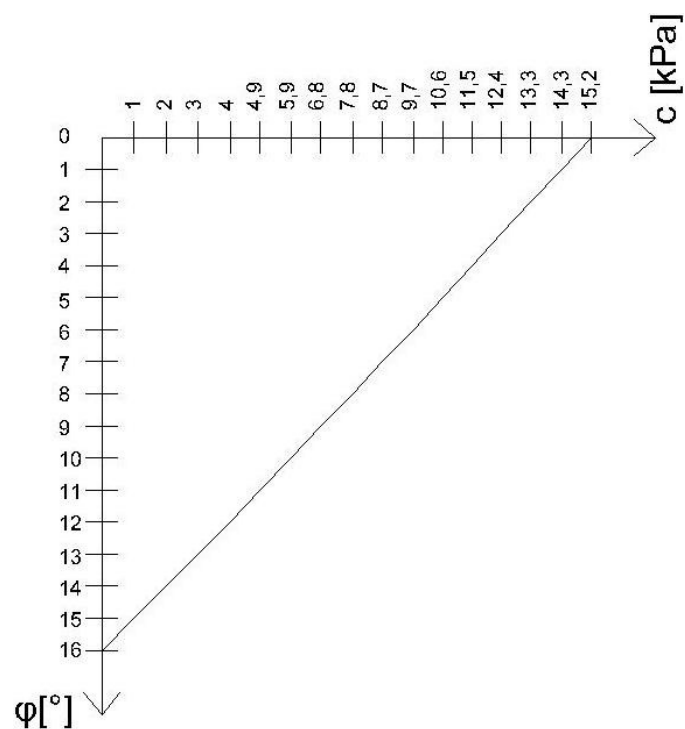
Obr. 18 Geologický řez, Zdroj: UNIGEO a.s.

Hloubkový dosah	Název zeminy	Symbol	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Modul přetvárnosti [MPa]	$\varphi_{ef}$ [°]		$c_{ef}$ [kPa]		$\varphi_{ef}^R$ [°]	$c_{ef}^R$ [kPa]	$\varphi_u$ [°]		$c_u$ [kPa]	
					lab.	ČSN	lab.	ČSN	lab.	lab.	lab.	ČSN	lab.	ČSN
13,0	jíl středně plastický	Cl	20,3	6	20,1	18,0	10,1	13,0				0,0		50,0

Tab. 2 Tabulka geotechnických charakteristik, Zdroj: UNIGEO a.s., vlastní zpracování

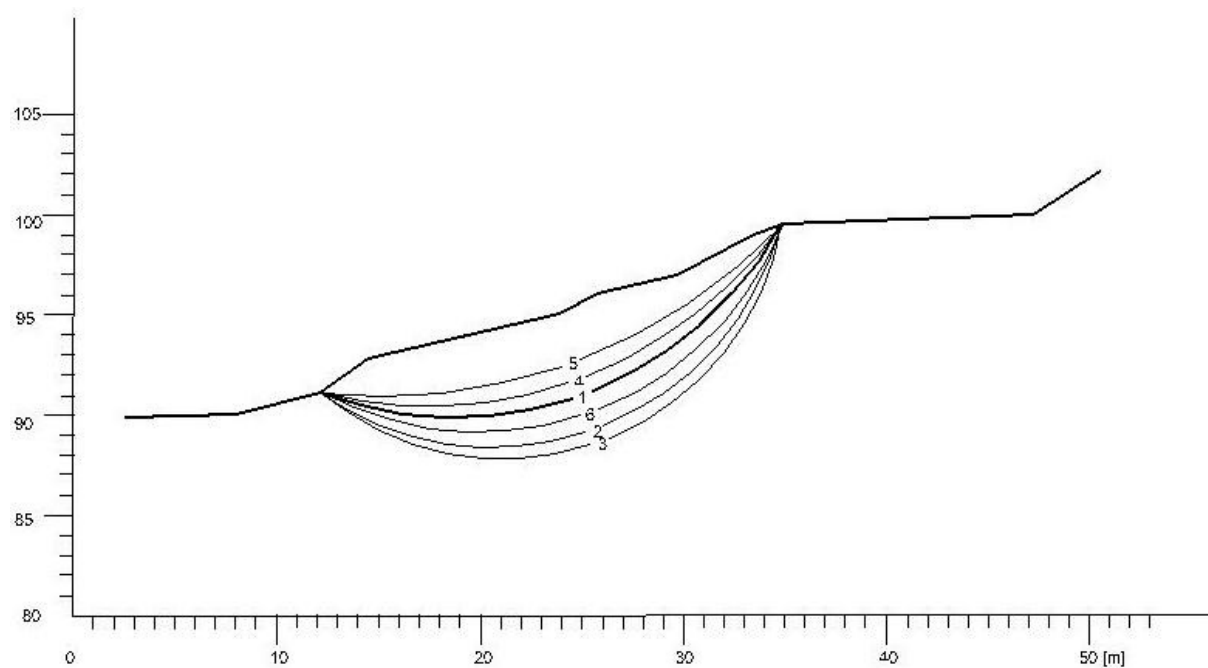
Zeminy zjištěné v geologickém průzkumu, byly nahrazeny jílem středně plastickým, jelikož jím byl svah z velké části tvořen a ostatní zeminy byly buďto velice podobné z geotechnického hlediska, nebo se vyskytovaly ve vrstvách s malou mocností.

Další postup výpočtu byl obdobný jako v prvním případě. Jednalo se o stanovení krajních bodů pro křivku závislosti  $c = f(\varphi)$  a dále její vytvoření iteračním postupem (viz obr. 19).



Obr. 19 Křivka závislosti  $c = f(\phi)$ , Zdroj: vlastní

Dále pak návrh dalších smykových ploch, konkrétně pěti (viz obr. 20).



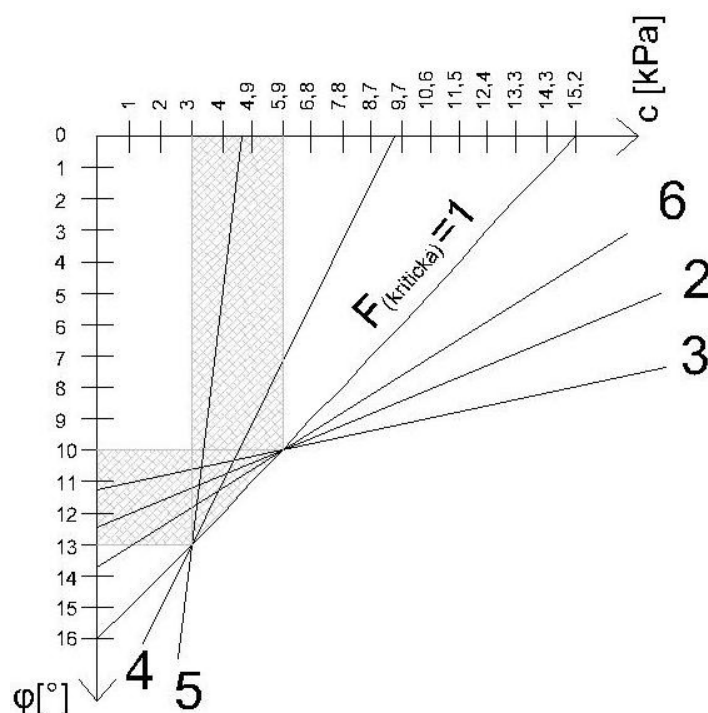
Obr. 20 další uvažované smykové plochy, Zdroj: vlastní

Následně byly vypočteny stupně stability pro tyto plochy při změně  $c$  a  $\varphi$ , při respektování závislosti  $c = f(\varphi)$  (viz tab. 3).

číslo smykové plochy		2	3	4	5	6
$\varphi[^\circ]$	$c[\text{kPa}]$	$F_n$				
0	15,2	0,94	0,86	1,09	1,29	0,97
1	14,3	0,94	0,88	1,09	1,27	0,97
2	13,3	0,94	0,89	1,07	1,24	0,97
3	12,4	0,95	0,9	1,07	1,22	0,97
4	11,5	0,96	0,92	1,06	1,2	0,98
5	10,6	0,97	0,94	1,06	1,18	0,98
6	9,7	0,98	0,95	1,05	1,17	0,99
7	8,7	0,98	0,96	1,04	1,14	0,99
8	7,8	0,99	0,98	1,04	1,12	0,99
9	6,8	0,99	0,99	1,02	1,09	0,99
10	5,9	1	1,01	1,02	1,08	1
11	4,9	1	1,03	1,01	1,05	1
12	4	1,01	1,04	1,01	1,03	1,01
13	3	1,01	1,06	1	1,01	1,01
14	2	1,02	1,07	0,99	0,98	1,01
15	1	1,02	1,09	0,97	0,96	1,01
16	0	1,03	1,1	0,97	0,94	1,01

Tab. 3 Stanovení stupně stability na jednotlivých smykových plochách, Zdroj: vlastní

Dále se jedná o graficko-početní přístup, ve kterém dojde k omezení intervalu možných hodnot (viz obr. 21).



Obr. 21 Graficko-početní přístup, Zdroj: vlastní

Z tohoto obrázku je patrné, že interval byl redukován na hodnoty pro  $\phi < 10; 13> [^\circ]$  a pro  $c < 3; 5,9> [\text{kPa}]$ . Vypočtené hodnoty jsou odlišné od hodnot, které mi byly poskytnuty v příloze geologického řezu (viz tab. 2). Což může být zapříčiněno tím, že výpočet nezahrnuje další faktory způsobené realizací silnice, jedná se o přetížení a změnu geologických poměrů při stavbě silnice. Dále se jedná o vliv vody. Ta nebyla při průzkumu zjištěna, ale s jistotou ji nelze vyloučit. Samozřejmě se také jedná o vlivy, jež jsou popsány v kapitole zabývající se odlišností mezi skutečnou a naměřenou smykovou pevností. Vypočtené parametry jsou nižší, což koresponduje s tím, že zkouškami provedenými firmou UNIGEO a.s., byly stanoveny vrcholové parametry smykové pevnosti, kdežto algoritmem byly vypočteny reziduální parametry smykové pevnosti zemin.

## 9 Závěr

V první části byl vypočten modelový svah, pro který byl stanoven obor možných hodnot  $\varphi$   $\langle 12; 18 \rangle$  [°] a  $c$   $\langle 14,5; 20,2 \rangle$  [kPa]. Originální hodnoty jež jsou  $\varphi = 15^\circ$  a  $c = 18$  kPa, leží v tomto oboru hodnot. V druhém případě byly pro skutečný svah stanoveny intervaly pro  $\varphi$   $\langle 10; 13 \rangle$  [°] a pro  $c$   $\langle 3; 5,9 \rangle$  [kPa], hodnoty stanovené laboratorně byly  $\varphi = 20,1^\circ$  a  $c = 10,1$  kPa.

V závěru lze prohlásit, že tato metoda je použitelná, je však podmíněna základními předpoklady, a to hlavně homogenitou svahu, existencí pouze jedné smykové plochy a funkční závislostí  $c = f(\varphi)$ . Dále pak je nutný spolehlivý model podloží, jenž je vytvořen ze spolehlivých geometrických údajů o svahu a smykové ploše. Je nutno ověřit výskyt diskontinuit, ty by použití této metody znemožnily. Při porovnávání výsledků je také třeba přihlédnout k vlivu reziduální pevnosti a celkově k rozdílnosti mezi skutečnou a naměřenou pevností.

## 10 Seznam literatury

### **Knihy:**

- [1] KOŘÍNEK, Robert; ALDORF, Josef. *Geotechnický monitoring*. 1. vydání. Ostrava : Vysoká škola báňská v Ostravě, 1994. 96 s. ISBN 80-7078-247-1.
- [2] ŠIMEK, Jiří; JESENÁK, Ján; EICHLER, Jaroslav; VANÍČEK, Ivan. *Mechanika zemin*. 1. vydání. Praha : SNTL - nakladatelství technické literatury, 1990. 388 s. ISBN 80-03-00428-4.
- [3] WEIGLOVÁ, Kamila. *Mechanika zemin*. 1. vydání. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2007. 186 s. ISBN 80-7204-507-5.

### **www stránky:**

- [4] HRUBEŠOVÁ, Eva, *Metody a zásady vyhodnocování monitorovacích měření, inverzní analýza* [online]. 8.1.2007 [cit. 20. dubna 2010]. Dostupné z <http://fast10.vsb.cz/hrubeso/mon15.htm>



## **11 Seznam tabulek**

Tab. 1 Stanovené stupně stability na jednotlivých smykových plochách, Zdroj: vlastní

Tab. 2 Tabulka geotechnických charakteristik, Zdroj: UNIGEO a.s., vlastní zpracování

Tab. 3 Stanovení stupně stability na jednotlivých smykových plochách, Zdroj: vlastní

## 12 Seznam obrázků

- Obr. 1 Smyková pevnost dle Coulomba, Zdroj: [2]
- Obr. 2 Reziduální smyková pevnost, Zdroj: [2]
- Obr. 3 Závislost smykového odporu na ulehlosti, Zdroj: [3]
- Obr. 4 Rozklad sil na rovinné smykové ploše, Zdroj: [3]
- Obr. 5 Síly na kruhové smykové ploše, Zdroj: [2]
- Obr. 6 Schéma sil u Pettersonovy metody, Zdroj: [2]
- Obr. 7 Schéma sil a uzavřený složkový obrazec pro jeden proužek pro jeden proužek u Bishopovy metody, Zdroj: [2]
- Obr. 8 Princip inverzní analýzy, Zdroj: [1], vlastní zpracování
- Obr. 9 Schéma možných smykových ploch ve svahovém tělese, Zdroj: [4]
- Obr. 10 Křivka závislosti pevnostních parametrů  $c$  na  $\varphi$ , odpovídající zvolené metodě mezní rovnováhy pro kritickou smykovou plochu, Zdroj: [4]
- Obr. 11 Závislost stupně stability na pevnostních parametrech a zvolené smykové ploše, Zdroj: [4]
- Obr. 12 Vyhodnocení intervalu možných hodnot pevnostních parametrů pro smykovou plochu lokalizovanou nad kritickou smykovou plochou, Zdroj: [4]
- Obr. 13 Schéma postupu pro inverzní stanovení pevnostních parametrů, Zdroj: [4]
- Obr. 14 Geometrie modelového svahu, Zdroj: vlastní
- Obr. 15 Závislosti  $c=f(\varphi)$ , Zdroj: vlastní
- Obr. 16 Další uvažované smykové plochy, Zdroj: vlastní
- Obr. 17 Graficko-početního přístup, Zdroj: vlastní
- Obr. 18 Geologický řez, Zdroj: UNIGEO a.s.
- Obr. 19 Křivka závislosti  $c=f(\varphi)$ , Zdroj: vlastní
- Obr. 20 další uvažované smykové plochy, Zdroj: vlastní
- Obr. 21 Graficko-početní přístup, Zdroj: vlastní

## 13 Seznam vzorců

Vzorec (1) Výpočet stupně stability, Zdroj: [2], vlastní zpracování

Vzorec (2) Mobilizovaná smyková pevnost, Zdroj: [2]

Vzorec (3) Smyková pevnost dle Pettersonovi metody, Zdroj: [2]

Vzorec (4) Zjednodušený vzorec pro případ  $\varphi=0$ , Zdroj: [2]

Vzorec (5) Podmínka ve svislém směru, Zdroj: [2]

Vzorec (6) Bishoppova rigorózní rovnice, Zdroj: [2]

Vzorec (7) Bishopova rovnice, Zdroj: [2]